

論文

角形鋼管を用いた軽量プレキャスト鋼コンクリート合成床版の開発

滝本和志*, 田中博一*, 朱暁旭*, 大久保宣人**, 山本将士***, 東山浩士****

*博 (工), 清水建設株式会社, 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

**博 (工), 日本ファブテック株式会社, 技術研究所 (〒302-0038 茨城県取手市下高井 1020)

***日本ファブテック株式会社, 橋梁設計部 (〒550-0001 大阪府大阪市西区土佐堀 1-3-7)

****博 (工), 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

床版取替え工事における急速施工を目的に、軽量コンクリートと角形鋼管を用いたプレキャスト鋼コンクリート合成床版の開発を行っている。本論文では、版の正曲げ試験により基本的な性能を確認し、押抜きせん断試験により底鋼板上に配置する角形鋼管のずれ止めとしての性能を把握した。さらに、鉄筋継手部をモデル化した載荷試験により、機械式定着筋を継手として用いることで、接合部長さを大幅に低減できる可能性が得られた。

キーワード: プレキャスト合成床版, 軽量コンクリート, 角形鋼管, 機械式定着筋

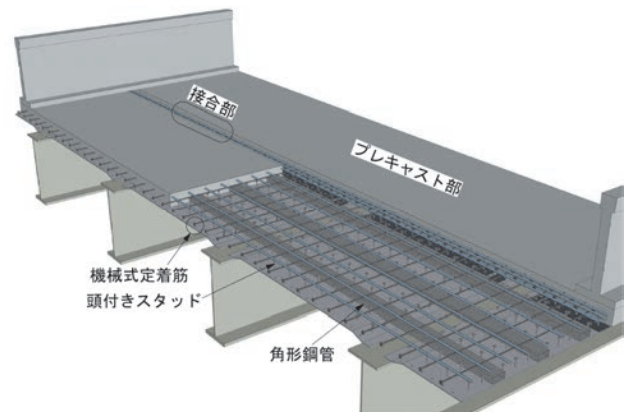
1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化が顕在化してきているが、高速道路においても、経過年数の増加とともに床版の劣化が進んでいることが報告¹⁾されている。東・中・西日本高速道路3会社の統計データ²⁾によると、2013年度末に供用から30年以上経過した橋梁延長は全体の約4割に達し、大規模更新計画で床版取替が予定されている橋梁延長は約224kmとなっている。

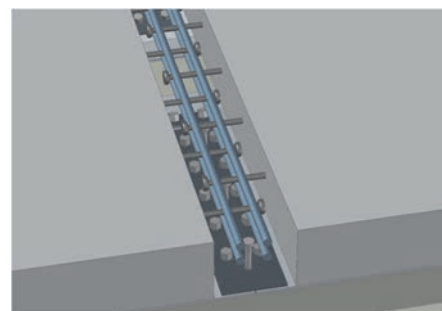
鋼コンクリート合成床版(以下、合成床版)は、剛性が大きく高い耐荷力を有しており、底鋼板により型枠・支保工を省略できることから、長支間床版としての採用事例が増えてきている。また、プレキャスト合成床版の開発³⁾により、床版取替工事にも適用され始めている。高速道路の床版取替工事は、施工時間や施工空間といった制約条件の他に、下部構造の耐震性能確保や新旧床版の段差解消の観点から、取替床版の厚さや重量にも制約を受ける場合がある。

そこで、既設道路橋の床版取替工事に適用することを目指して、軽量コンクリートと角形鋼管を用いることで、軽量で薄肉化が可能なプレキャスト合成床版を開発することとした。

本論文では、床版としての基本的な曲げ耐力を確認するために実施した版の正曲げ試験、軽量化を図るために配置した角形鋼管のずれ止めとしての性能について検討した押抜きせん断試験⁴⁾および接合部の施工合理化を目指して考案した機械式定着筋を用いた新しい継手構造の継手性能に関する検討⁵⁾結果を報告する。



(a) 全体イメージ



(b) 接合部詳細

図-1 プレキャスト合成床版の概要

2. プレキャスト合成床版の概要

本論文で提案するプレキャスト合成床版のイメージ図を図-1(a)に示す。橋軸直角方向に角形鋼管を配置し、底鋼板に断続溶接することで、床版断面に10%程度

の中空部を設けることができる。角形鋼管には、軽量化だけでなく、底鋼板の補剛とずれ止めとしての機能も期待している。橋軸直角方向のずれ止め機能と底鋼板とコンクリートを上下に分離しようとする力に対しては、頭付きスタッドを配置する。プレキャスト部には、設計基準強度 50N/mm²の軽量コンクリート 1 種を用いる。

接合部の詳細を図-1 (b) に示す。底鋼板は添接板を介してボルト接合する。配力鉄筋は重ね継手とし、両端を加熱成形によって拡径部を設けた機械式定着筋 (Tヘッド工法鉄筋) とすることで、継手長さの短縮を図るものである。脆性破壊を防止するために、接合部の主鉄筋は配力鉄筋の上下に配置する。接合部には、物質透過抵抗性や付着強度が高く、急速施工が期待できるラテックス改質速硬コンクリート (LMFC) を用いる。

角形鋼管と軽量コンクリートを使用することにより、同じ厚さの RC 床版と比較して約 10%、従来の合成床版に対しては約 20%の軽量化となる。

3. 版の正曲げ試験

3.1 試験概要

試験体は 2 体で、角形鋼管の配置をパラメータとした。No.1 試験体は角形鋼管の直上を載荷位置に、No.2 試験体は角形鋼管の中間を載荷位置とした。試験体の幅は 2,000mm、支間長は 3,000mm、厚さ 180mm とした。底鋼板 (SM400) は 8mm、角形鋼管 (STKR400) は 150mm × 75mm (厚さ 3.2mm) とした。圧縮鉄筋は SD345 とし、主鉄筋に D22 を 125mm ピッチで、配力鉄筋に D16 を 250mm ピッチで配置し、純かぶり 30mm を確保した。角形鋼管と頭付きスタッドの配置を図-2 に、No.1 試験体の配筋図を図-3 に示す。鉄筋配置は No.2 試験体も同一である。

試験体中央に設置した 200mm × 500mm の合板の上に、同じ平面寸法の載荷フレームを設置し、合板と載荷フレームを介して荷重を載荷した。支点はテフロンを用いたピン・ローラー支承で二辺単純支持とした。載荷は、一方向漸増繰返し載荷とした。設計荷重は 120kN である。

計測項目は、載荷荷重、試験体の鉛直変位、底鋼板、角形鋼管、鉄筋およびコンクリート上面のひずみとした。

3.2 試験結果と考察

材料試験結果を表-1 に、鋼材の引張試験結果を表-2 に示す。圧縮試験は載荷試験時に実施した。

図-4 に荷重-変位曲線の比較を示す。2 体ともに載荷荷重が 300kN を越えたところで底鋼板とコンクリートの付着が切れる音がして剛性が低下し、700kN を越えたところで押抜きせん断破壊した。側面の最終ひび割れ状況を図-5 に示す。No.2 試験体は試験終了後に切断して内部の観察を行ったので、切断面のひび割れ状況も合わせて示す。

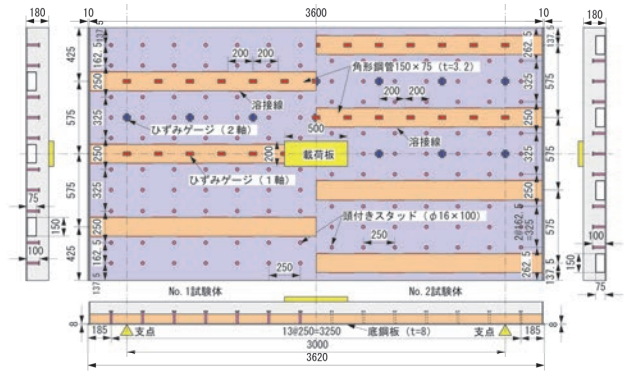


図-2 ずれ止め配置図

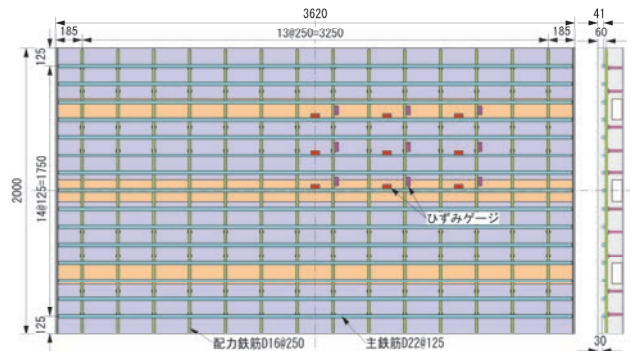


図-3 配筋図 (No.1 試験体)

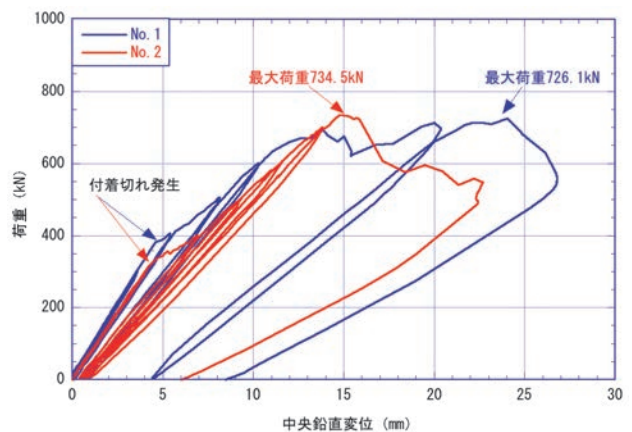


図-4 荷重-変位曲線

表-1 材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
軽量コンクリート	62.1	23.2

表-2 鋼材引張試験結果

種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
主鉄筋 D22	373.4	556.5	185.3	22
配力鉄筋 D16	371.6	560.6	181.4	24
底鋼板	332.8	458.3	175.1	36
角形鋼管	347.5	446.5	182.3	31

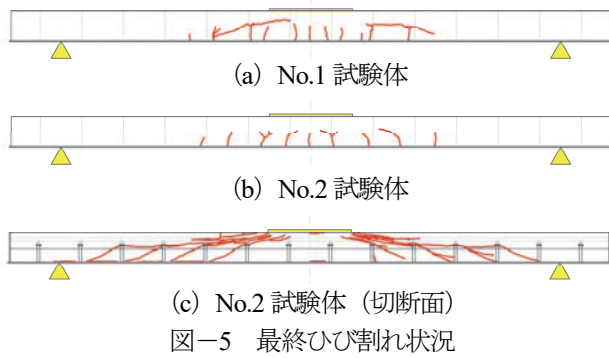


図-5 最終ひび割れ状況

表-3 試験結果一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時の中央変位 (mm)	初期剛性 (kN/mm)
No.1	726.1	24.0	84.6
No.2	734.5	14.8	74.2

表-3 に最大荷重と最大荷重時の試験体中央変位および初期剛性を示す。初期剛性は、弾性挙動を示していた300kN時の割線剛性として求めた。荷重位置に関わらず、最大荷重はほぼ同じ値を示した。付着切れ後の2次剛性は同等であるが、初期剛性はNo.1試験体の方が大きくなった。これは、角形鋼管の直上を荷重したことが影響しているものと考えられる。

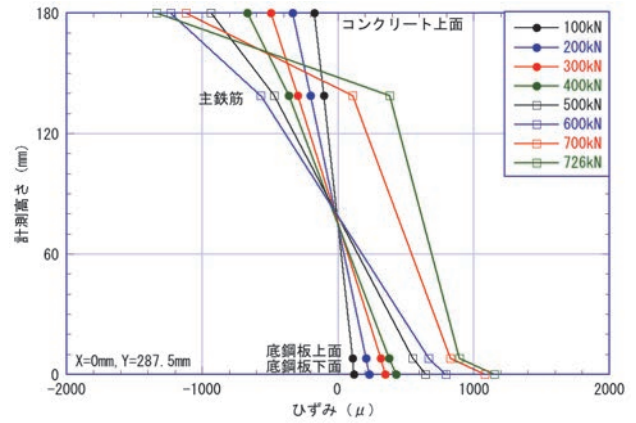
図-6に支間(X)方向の断面ひずみ分布図を示す。平面座標の原点は荷重点中央、高さ方向は底鋼板下面を原点とした。2体ともに角形鋼管の上面付近が中立軸位置となっている。No.1試験体は400kNまで、No.2試験体は300kNまで直線分布しており、平面保持が成り立っていたものと考えられる。これは、図-4の付着切れ発生時点と一致している。付着切れ以降は、重ね梁のような挙動を示しており、特にNo.1試験体の主鉄筋には引張ひずみが発生している。

4. 角形鋼管のずれ止め試験

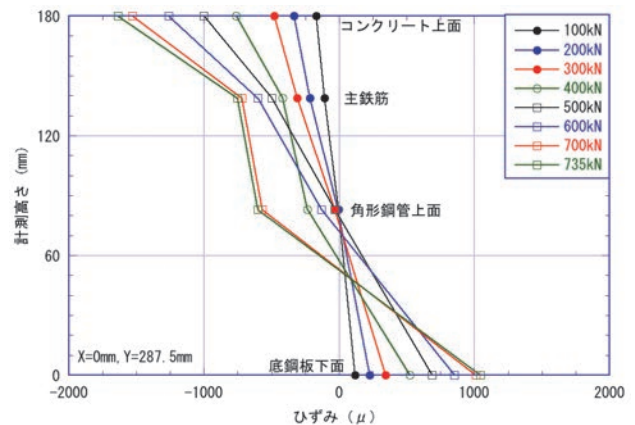
本論文で提案するプレキャスト合成床版では、軽量化を図るために角形鋼管を用いているが、角形鋼管には、床版の軽量化だけでなく、底鋼板の補剛とずれ止めとしての機能も期待していることから、ここでは、角形鋼管のずれ止め性能について、押抜きせん断試験により検討した。

4.1 試験概要

押抜きせん断試験の標準的な試験方法として、頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)が提案されている。本研究では、この試験方法を参考に、角形鋼管のせん断耐力と疲労強度を把握するために、静的押抜きせん断試験と押抜き疲労試験を行った。



(a) No.1 試験体 (X=0mm)



(b) No.2 試験体 (X=0mm)

図-6 ひずみ分布図

試験体はすべて同一仕様で、試験体数は、静的試験体(SP1~SP3)3体、疲労試験体(FP50, FP60, FP65, FP70, FP80)5体の合計8体とした。疲労試験体のFPの後の数値は、静的試験で得られた押抜きせん断耐力に対する比率である。試験体の形状寸法を図-7に示す。試験体は、420mm×400mmのフランジ(厚さ22mm)に、3章と同じ角形鋼管を溶接し、そこに500mm×400mmのコンクリートブロック(厚さ174mm)を打設したT形鋼2つを添接板と高力ボルトで結合した。フランジと角形鋼管の溶接は、溶接による残留変形を抑制する目的で、中央200mmの範囲とした。角形鋼管内部は中空とし、コンクリートと接するフランジ面にグリース等の剥離剤は塗布していない。

静的試験体のコンクリートブロックと試験機ベッドの間は石膏を用いて不陸調整を行い、溝形鋼とPC鋼棒で開き止めを設置した。静的試験の荷重方法は、一方方向(押し込みのみ)の漸増繰返し荷重とした。除荷は、荷重が50kN, 100kN, 150kN, 200kN, 250kN, ずれ変位(フランジとコンクリートブロックの鉛直方向の相対変位)が0.25mm, 0.50mm, 0.75mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 3.0mm, 4.5mm, 6.0mm, 8.0mm, 10mmに達した時点で行うことを基準とした。ずれ変位が10mmに達した時点で開き止めを外し、荷重がほぼ0になるところまで荷重を行った。

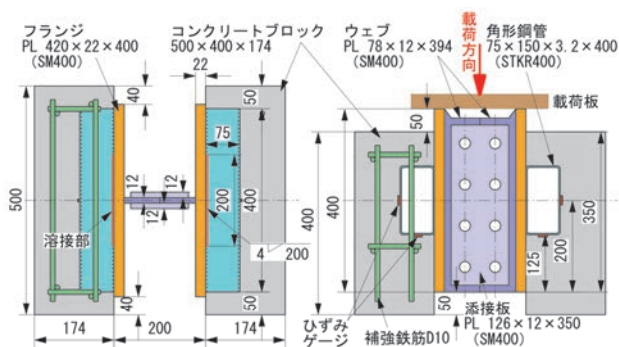


図-7 押抜き試験体

表-4 材料試験結果

試験の種類	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
静的試験	40	58.4	22.7
疲労試験	90	67.2	24.5
	166	67.0	25.6

表-5 せん断耐力の計算値

計算値 (kN)		実験値 (kN) V_{max}	実験値/ 計算値
式 (1)	式 (2)		
235.6	285.6	288.0	1.22

疲労試験体の設置や開き止めは静的試験と同様とした。下限荷重を 10kN とし、荷重振幅を静的試験で得られた押抜きせん断耐力の 50%~80% の範囲で、圧縮側の片振り (sin 波, 2~5Hz) とし、1MN 高速疲労試験機を用いて繰返し載荷を行った。ここでは、最大振幅が 4mm に達した時点までを疲労破壊と定義した。

計測項目は、静的・疲労試験共通で、載荷荷重、鉛直ずれ変位、角形鋼管および PC 鋼棒のひずみとした。ずれ変位は、左右表裏 4 点の平均値とした。角形鋼管のひずみは側面と下面中央で計測した。疲労試験における計測は、繰返し回数が 1 万、5 万、10 万、30 万、50 万、80 万、100 万回に達した時点で行った。100 万回以降は、適宜計測を行った。

4.2 静的試験結果

軽量コンクリートの材料試験結果を表-4 に示す。疲労試験は、試験開始時と終了時の 2 回実施した。

静的試験の結果、3 体の破壊状況はほぼ同様で、角形鋼管下側のコンクリートの圧縮破壊となった。ずれ変位が 0.25mm を越えると、フランジと角形鋼管下側の溶接部から斜め下方にひび割れが発生し、ずれ変位の増加に伴いひび割れ幅が拡大していった。図-8 にせん断力とずれ変位の関係を示す。せん断耐力の平均値は 288.0kN となった。ずれ変位が 1.0mm~1.5mm でせん断力がピークに達した後は、ずれ変位が増加しても荷重増加は見られず、徐々に荷重が低下していった。開き止め用の PC 鋼棒を外した後のせん断力は、10mm 時点のせん断力の

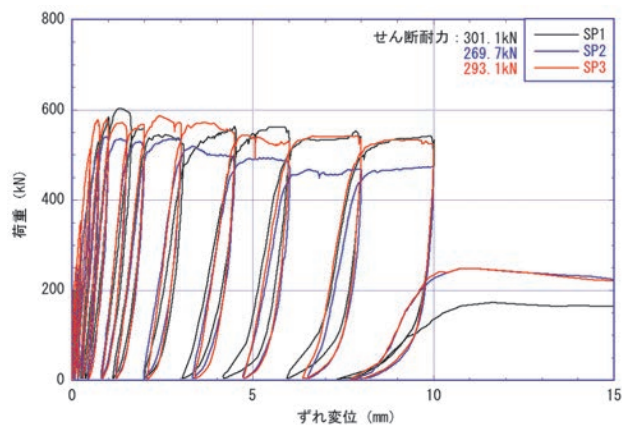


図-8 せん断力とずれ変位の関係

半分にも達しなかったことから、ずれ変位が 10mm に達する前に破壊に至っていたものと考えられる。試験終了後にコンクリートを除去して溶接部を観察したところ、溶接止端部にき裂は見られたものの、貫通したき裂は見られなかった。

4.3 せん断耐力評価法

角形鋼管のせん断耐力評価式がないことから、角形鋼管を厚さ 3.2mm、高さ 75mm の形鋼シアコネクタと見なして、形鋼シアコネクタの設計せん断耐力計算式⁸⁾を用いてせん断耐力を算定した。式(1)はコンクリートが破壊する場合の耐力、式(2)は形鋼シアコネクタが破壊する場合の耐力を示す。

$$V_{su} = 0.0056h_{sc}w_{sc}\sqrt{f'_{cd}}k_1k_2k_3/\gamma_b \quad (1)$$

$$V_{su} = 0.001t_{sc}w_{sc}f_{scy d}/\sqrt{3}/\gamma_b \quad (2)$$

ここに、

V_{su} : 形鋼シアコネクタのせん断耐力 (kN)

$k_1 = 2.2(t_{sc}/h_{sc})^{2/3}$ ただし、 $k_1 \leq 1$

$k_2 = 0.4\sqrt{t_f/t_{sc}} + 0.43$ ただし、 $k_2 \leq 1$

$k_3 = \sqrt{s_{sc}/h_{sc}/10}$ ただし、 $k_3 \leq 1$

f'_{cd} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

h_{sc} : 形鋼の高さ (mm)

w_{sc} : 作用せん断力と直角方向の形鋼の幅 (mm)

t_{sc} : 形鋼の溶接部を考慮した厚さもしくは母材の厚さのうち小さい方の値 (mm)

$f_{scy d}$: 形鋼の引張降伏強度 (N/mm²)

t_f : 形鋼が付いている鋼板の厚さ (mm)

s_{sc} : 作用せん断力方向の形鋼の配置間隔 (mm)

γ_b : 部材係数 (1.0 とする)

形鋼シアコネクタの設計せん断耐力式で算定したせん断耐力を表-5 に示す。式(1)の方が小さく、実験と同様にコンクリートの破壊で最大せん断力が決まることになる。計算値に対する実験値の比は 1.22 と近似してお

表-6 疲労試験結果一覧

試験体	荷重振幅 R (kN)	破壊回数 N
FP80	230	84,682
FP70	200	315,442
FP65	185	826,160
FP60	175	4,168,159
FP50*	145	5,000,000 以上

* : FP50 は破壊していない

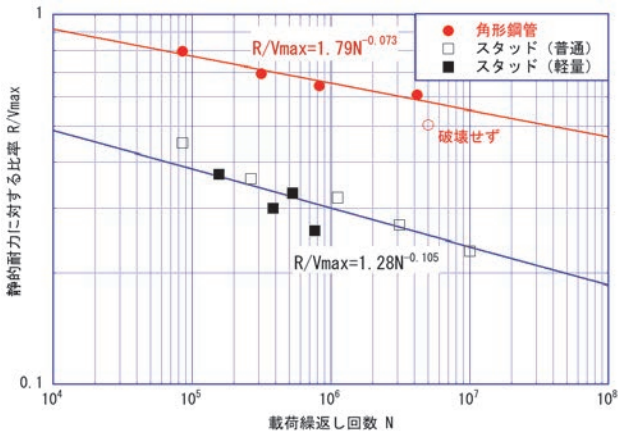


図-9 ずれ止め S-N 曲線^{9),10)}

り、形鋼シアコネクタの設計せん断耐力式を用いて、角形鋼管のせん断耐力を算定できる可能性が得られた。

4.4 疲労試験結果

表-6 に疲労試験結果を示す。5 体のうち FP50 試験体は 500 万回繰返し载荷しても破壊しなかったため、载荷を途中で打ち切った。破壊した 4 体の破壊状況はほぼ同様で、溶接部近傍の角形鋼管の疲労破断であった。静的試験に比べてコンクリートブロックの損傷は軽微であった。これは、最大振幅 4mm を破壊基準としたためと考えられる。角形鋼管の溶接部近傍では、溶接止端部にき裂や破断箇所が多数見られた。

図-9 に角形鋼管と頭付きスタッドの S-N 曲線^{9),10)}を合わせて示す。角形鋼管の疲労強度は頭付きスタッドの疲労強度を上回っており、角形鋼管はずれ止めとして十分な疲労強度を有しているといえる。

5. 機械式定着筋の継手性能試験

プレキャスト床版橋軸方向の配力鉄筋の継手構造について、部材の薄肉化や継手長さの短縮を図るために、機械式定着筋を鉄筋継手として用いることを提案している。鉄筋継手の性能が問題となるのは、中間支点部近傍の負曲げモーメントを受ける場合であるので、プレキャスト合成床版が負曲げを受けた場合の圧縮鉄筋接合部の挙動を確認し、接合部仕様を決定することを目的として、重ね継手長さをパラメータとした継手部の静的载荷試験を実施した。

表-7 接合部試験体の種類

試験体名	継手長さ	接合部長さ (mm)	補強方法
JT-15	15d	380	なし
JT-10	10d	290	
JT-5R	5d	200	主鉄筋追加
JT-5P	5d	200	補強プレート

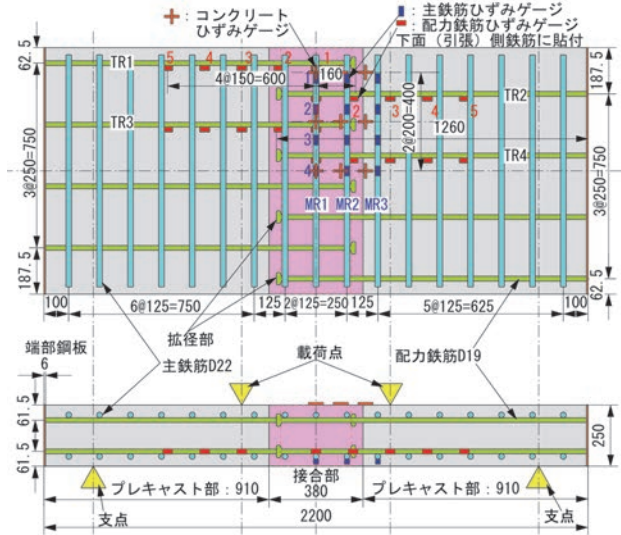


図-10 JT-15 試験体配筋図

5.1 試験概要

中央に現場打ち接合部を有する試験体 4 体を製作した。圧縮側と引張側ともに T ヘッド工法鉄筋を継手として用いた。試験パラメータは、重ね継手長さ (15d, 10d, 5d) とし、継手長さ 5d の試験体は、脆性破壊を防止するために、主鉄筋の追加や補強プレートによる補強を施した。試験体の幅は 1000mm、長さは 2200mm (支間 1800mm) とし、接合部が等曲げ区間となるよう 3 等分点载荷を行った。試験体の種類を表-7 に、JT-15 の配筋図を図-10 に示す。図-10 に示すゲージ貼付位置は全試験体共通とした。

計測項目は、载荷荷重、試験体の鉛直変位、プレキャスト部と接合部の界面の開き、鉄筋ひずみ、補強プレートおよびコンクリート表面ひずみとした。

5.2 試験結果と考察

表-8 に材料試験結果を、表-9 に試験結果一覧を示す。ひび割れ発生までは、10kN ごとにひび割れ計測を行い、ひび割れ発生荷重を求めた。降伏荷重は、配力鉄筋に貼り付けたひずみゲージのうち、どこか 1 箇所の計測点の値が降伏ひずみ (2085 μ) を越えた時点とした。すべての試験体が鉄筋降伏後にプレキャスト部のコンクリート圧壊で終局に至っており、界面のひび割れが大きく開くことはなかったことから、今回検討した 4 種類の継手仕様は、どれも十分な継手性能を有しているものと推察される。

表-8 材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
軽量コンクリート	62.1	23.2
LMFC	67.3	34.6

表-9 試験結果一覧

試験体名	ひび割れ発生荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
JT-15	100	316.8	373.2
JT-10	100	261.7	381.6
JT-5R	110	267.7	378.4
JT-5P	90	243.8	356.3

図-11 に各試験体の荷重-変位関係の包絡線を示す。中央変位が 20mm までは、どの試験体も同様の挙動を示した。図-12 に JT-5R 試験体の載荷荷重が 150kN, 200kN および配力鉄筋降伏時の配力鉄筋のひずみ分布図を示す。主鉄筋ひずみは、1 本につき 4 箇所計測しているが、4 点のひずみを同じ位置にプロットした。試験体寸法、支持条件よりは挙動を示したため、主鉄筋にはほとんどひずみが発生していない。配力鉄筋は、載荷点位置のひずみが最も大きくなっているが、これは、ひび割れ発生位置の影響が大きいものと考えられる。

6. まとめ

プレキャスト合成床版の開発において実施した版の正曲げ試験、角形鋼管の押抜きせん断試験および機械式定着筋を用いた新しい継手構造の継手性能に関する静的載荷試験の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 角形鋼管と軽量コンクリートを用いた合成床版は、設計荷重を大きく越える 300kN まで、底鋼板とコンクリートが一体となった弾性挙動を示した。
- (2) 押抜きせん断試験より、角形鋼管はずれ止めとして十分な静的耐力・疲労強度を有している。
- (3) 形鋼シアコネクタの設計せん断耐力式を用いて、角形鋼管のせん断耐力を算定できる可能性が得られた。
- (4) 今回検討した 4 種類の継手仕様は、どれも十分な継手性能を有している。

参考文献

- 1) 国土交通省, 床版の損傷事例 : http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_4.pdf (閲覧日: 2018 年 6 月 11 日)
- 2) 国土交通省, コンクリート橋 (上部構造) の損傷事例 : http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_2.pdf (閲覧日: 2018 年 6 月 11 日)
- 3) 東・中・西日本高速道路の更新計画について

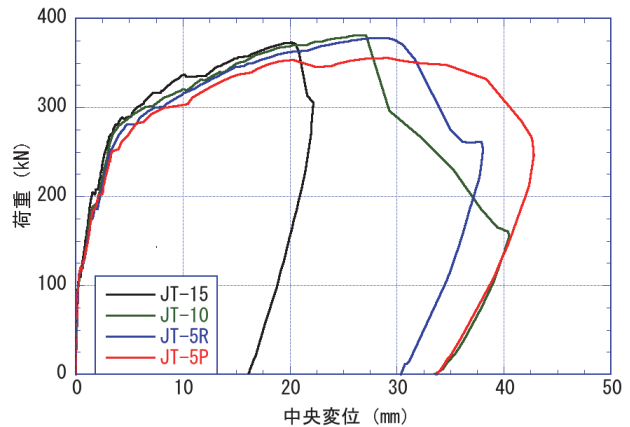


図-11 荷重-変位包絡線

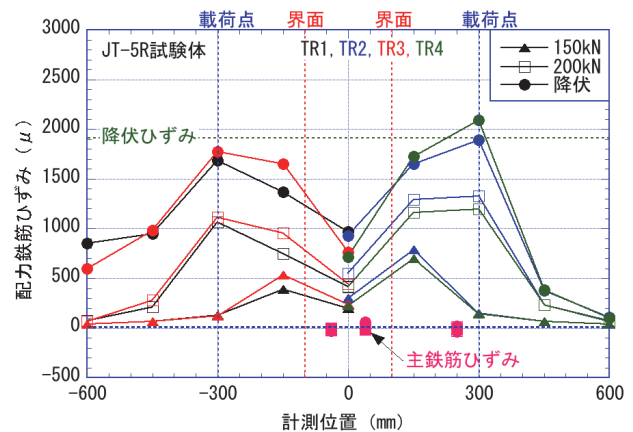


図-12 配力鉄筋のひずみ分布 (JT-5R)

<http://www.e-nexco.co.jp/koushin/pdfs/150116.pdf> (閲覧日: 2018 年 6 月 11 日)

- 4) 水野浩, 鳥山裕史, 松井繁之, 街道浩: プレキャスト合成床版の合理化継手構造の継手挙動, 土木学会第 65 回年次学術講演会論文集, I-308, pp.615-616, 2010
- 5) 朱曉旭, 滝本和志, 大久保宣人, 東山浩士: 角形鋼管のずれ止め性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1165-1170, 2018
- 6) 滝本和志, 田中博一, 山本将士, 東山浩士: プレキャスト床版の継手構造に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.577-582, 2018
- 7) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案) とスタッドに関する研究の現状, JSSC テクニカルレポート No.35, 1996
- 8) (公社) 土木学会: 2014 年制定 複合構造標準示方書「設計編」, 2015
- 9) 児島哲朗, 鈴木喜弥, 阿部久義, 藤原良憲, 橘吉宏, 平城弘一: 軽量骨材コンクリートを用いたジベル押抜きせん断疲労試験, 土木学会第 59 回学術講演会, 2004
- 10) 松井繁之, 平城弘一: 限界状態設計法のための頭付きスタッドの静的・疲労強度に関する評価式, 第 2 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1989

(2018 年 7 月 20 日受付)